

KISSsoft AG - +41 55 254 20 50
 Uetzikon 4 - +41 55 254 20 51
 8634 Hombrechtikon - info@KISSsoft.AG
 Switzerland - www.KISSsoft.AG

KISSsoft Tutorial: Stirnrad Feinauslegung

1 Aufgabenstellung

1.1 Aufgabenstellung

Es soll ein Stirnradpaar ausgelegt werden, das bei einer geforderten Lebensdauer von 5'000 h eine Leistung von 5 kW bei einer Antriebsdrehzahl von 400 1/min übertragen kann (Anwendungsfaktor = 1.25). Die Übersetzung soll 1:4 (ins Langsame) betragen, die Zahnräder werden aus 18CrNiMo7-6 gefertigt. Das Stirnradpaar ist bezüglich Geräuschentwicklung/Überdeckung zu optimieren. Der Festigkeitsnachweis ist nach ISO6336, Methode B zu führen.

1.2 Zahnradberechnung (Stirnradpaar) starten

Nach Installation und Freischaltung kann KISSsoft aufgerufen werden. Der Programmstart erfolgt üblicherweise mittels „Start→Programme→KISSsoft 03-2011→KISSsoft“. Es erscheint die folgende KISSsoft Benutzeroberfläche:

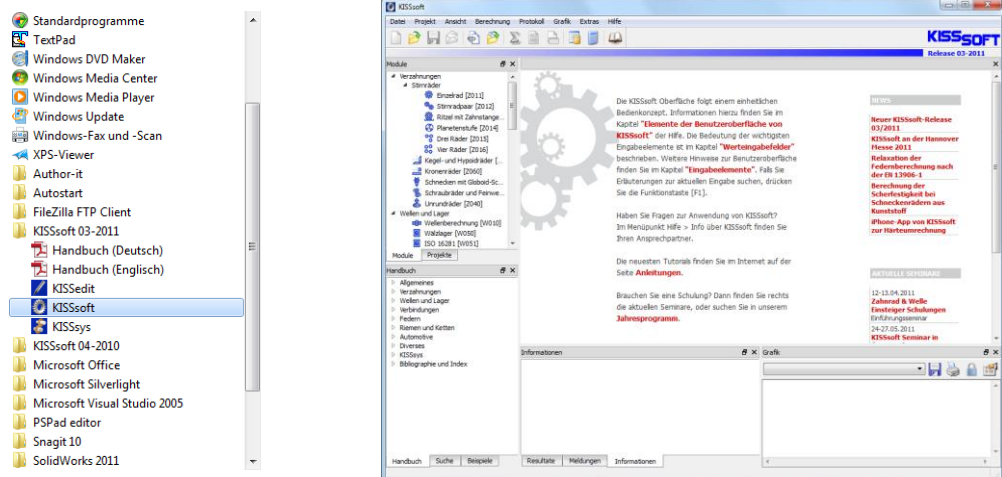


Abbildung 1.1 Starten von KISSsoft, Startfenster

Über das Modulbaumfenster im Tab „Module“ wird die Berechnung „Stirnradpaar“ aufgerufen:

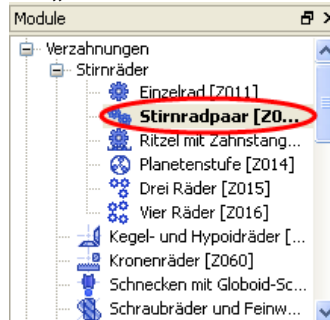


Abbildung 1.2 Aufruf der Stirnradberechnung

Das in diesem Tutorial durchgearbeitete Beispiel kann über „Datei/Öffnen“ und Auswahl von „Tutorial-009-Step1“ (bis „Tutorial-009-Step5“) oder über den Tab „Beispiele“ geöffnet

werden. In den einzelnen Kapiteln dieses Tutorials wird jeweils erwähnt, welche Datei (wie unten gezeigt) zu öffnen ist.

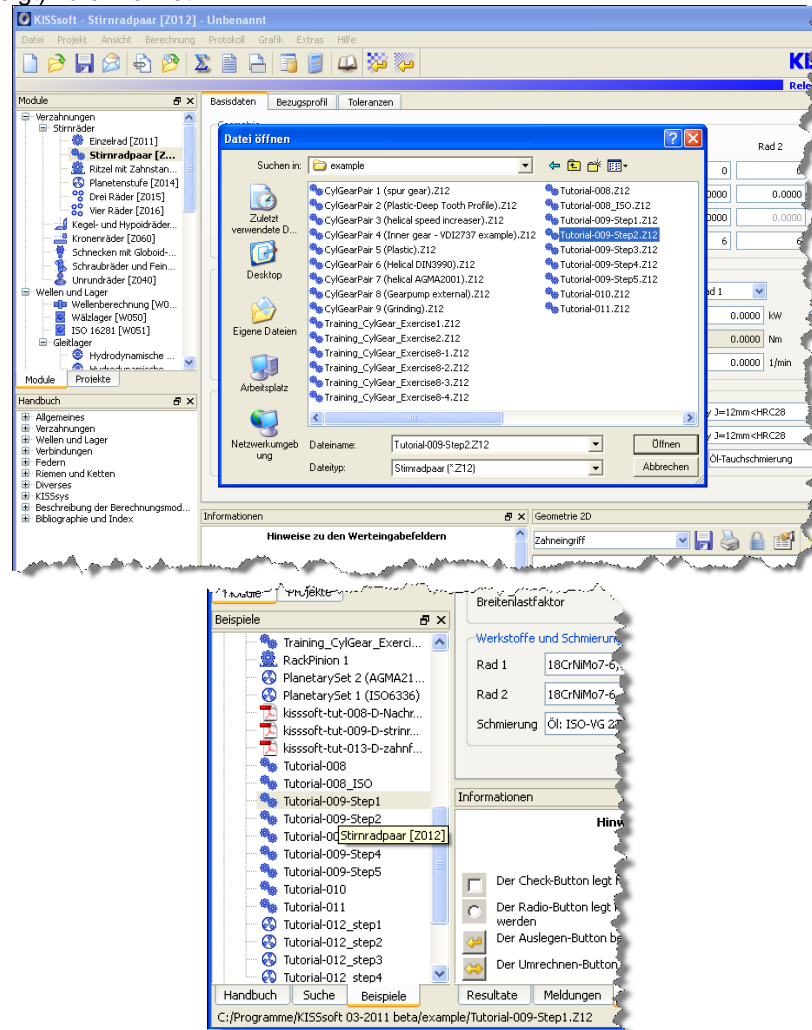
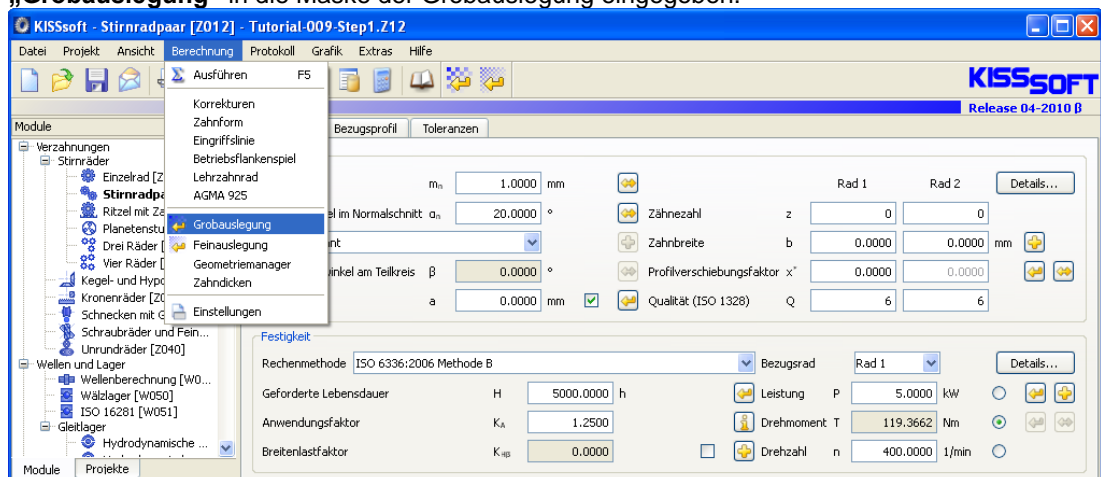


Abbildung 1.3 Möglichkeiten zum Öffnen eines Zwischenstandes des im Tutorial bearbeiteten Beispiels

2 Grobauslegung eines Stirnradpaares

2.1 Grobauslegung aufrufen

Die Grobauslegung bietet eine vernünftige erste Auslegung der Stirnradstufe. Hierzu werden die geforderten Eckdaten nach Aufruf der Grobauslegung über „**Berechnung**“ → „**Grob- auslegung**“ in die Maske der Grobauslegung eingegeben.



Um direkt zu diesem Stand der Berechnung zu gelangen, Datei „Tutorial-009-Step1“ öffnen

Abbildung 2.1 Aufruf Grobauslegung

Wesentlich sind hier die Vorgabe der gewünschten Übersetzung (inklusive der zulässigen Abweichung in Prozent (**hier 5%**)) und die Eingabe der zu übertragenden Leistung und des Werkstoffs. Ausserdem kann eine Vorgabe des gewünschten Schrägungswinkels oder Achsabstands eingegeben werden. Der Schrägungswinkel hängt mit der Lagerung der Wellen zusammen, je nachdem wie viel Axialkraft die Lager aufnehmen können, darf der Schrägungswinkel grösser oder kleiner sein. Die später durchgeführte Feinauslegung erlaubt dann anschliessend die Optimierung des Schrägungswinkels. Hier, in der Grobauslegung, soll nur die ungefähre Grösse des Schrägungswinkels angegeben werden bzw. „null“ für Gradverzahnung. Im Eingabefenster „**Grobbauslegung**“, Bereich ‚Geometrie‘ können weitere Vorgaben getroffen werden z.B. zu Zähnezahnbereich des Ritzels, Grössenverhältnissen oder Achsabstand.

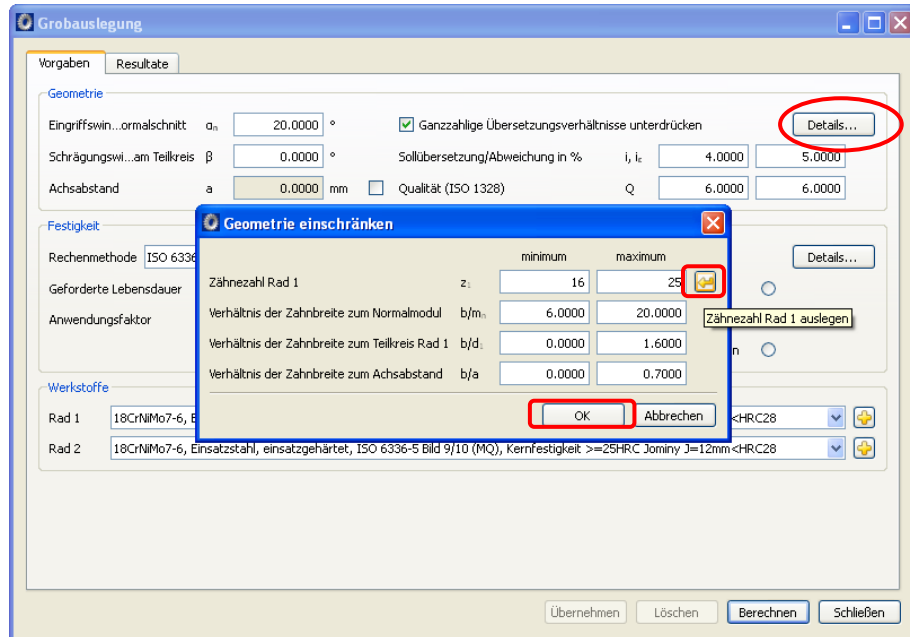


Abbildung 2.2 Eingabefenster Grobauslegung Bereich: ‚Geometrie‘ – Vorgaben Zähnezahl Rad 1

Die zu erreichenden Sicherheiten können über den Button „**Details**“ im Eingabefenster „**Grobbauslegung**“, Bereich ‚Festigkeit‘ vorgegeben werden.

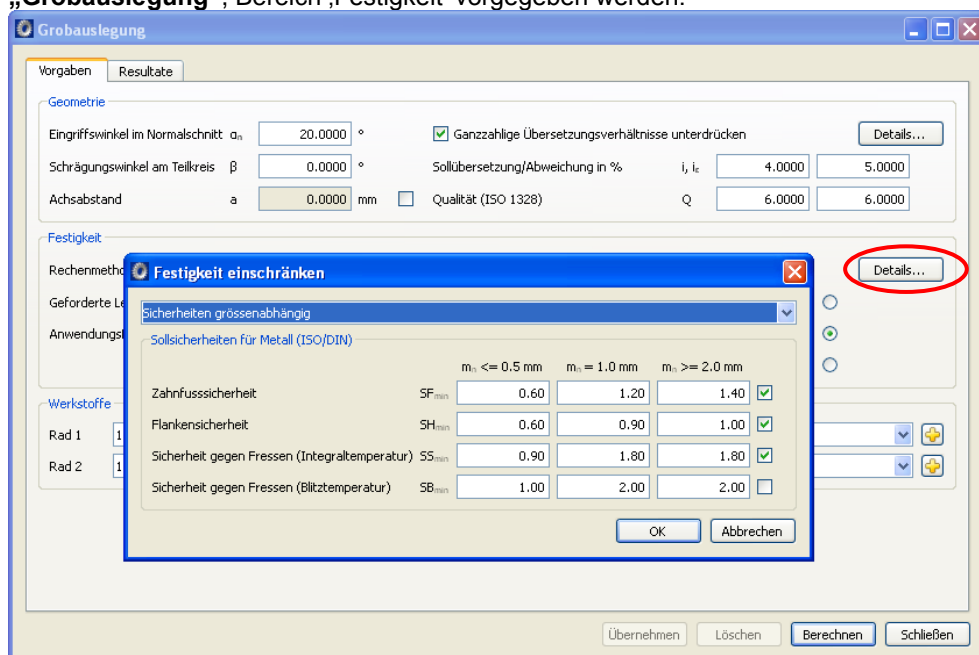
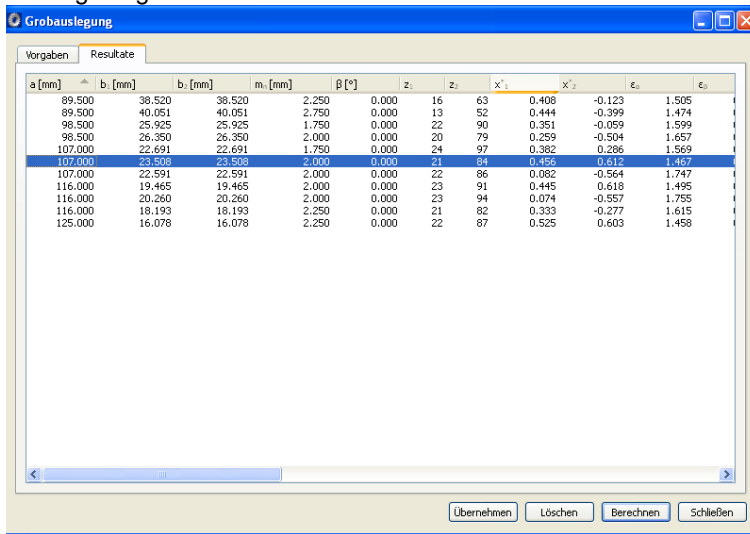


Abbildung 2.3 Eingabefenster Grobauslegung Bereich: ‚Festigkeit‘ – Vorgaben Sicherheiten

Über den Berechnen-Button berechnet KISSsoft verschiedene Lösungen für ein Zahnradpaar, das die gestellten Bedingungen erfüllt. Diese Lösungen werden in der unten gezeigten Liste angezeigt.



Die in der Resultatliste verwendeten Kriterien wie Achsabstand a, Breite b usw., können über rechten Mausklick gewählt werden.

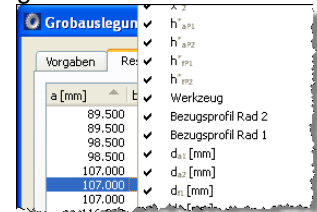
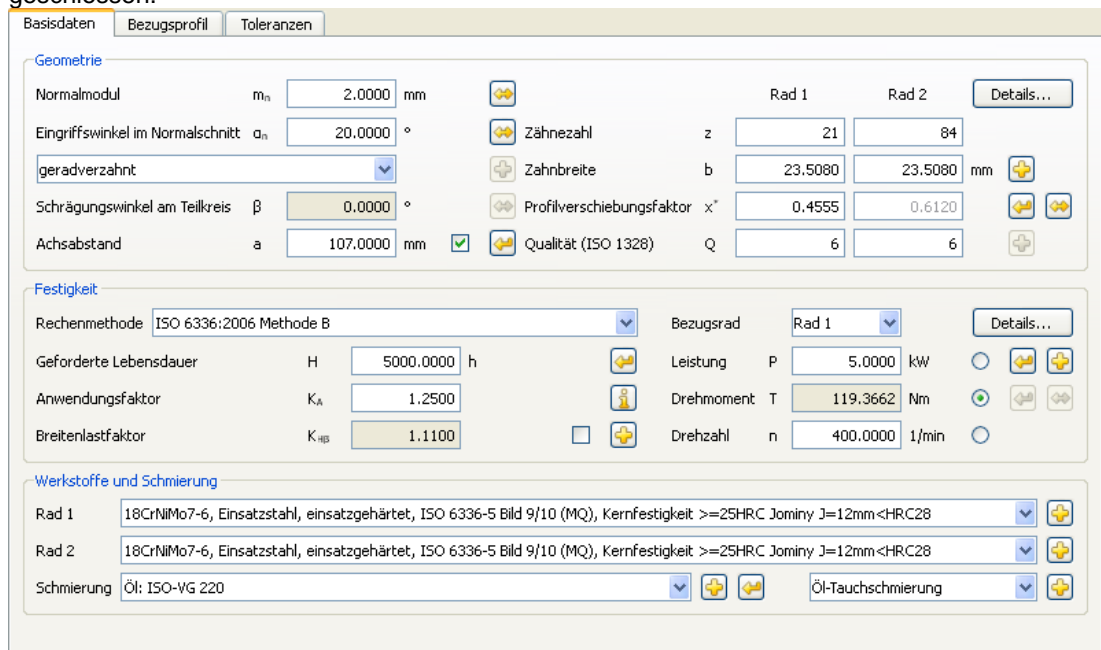


Abbildung 2.4 Stirrad-Grobbauslegung, Resultate

Um eine Lösung (hier mit 107 mm Achsabstand) auszuwählen, wird sie in der Liste selektiert und über den Button „Übernehmen“ übernommen und über „Schliessen“ anschliessend geschlossen.



Um direkt zu diesem Stand der Berechnung zu gelangen, Datei „Tutorial-009-Step2“ öffnen

Abbildung 2.5 Normalmodul, Zähnezah, Breite, Profilverschiebung und Achsabstand wie von KISSsoft vorgeschlagen

2.2 Anpassungen

Die vorgeschlagenen Werte, z.B. für die Zahnradbreite, können nun manuell angepasst werden, z.B. Breite des Ritzels auf 28 mm, Breite des Zahnrades auf 27 mm (direkt in die entsprechenden Felder eintippen).

Im Tab „Bezugsprofil“ kann das Bezugsprofil in der Dropdownliste geändert werden.

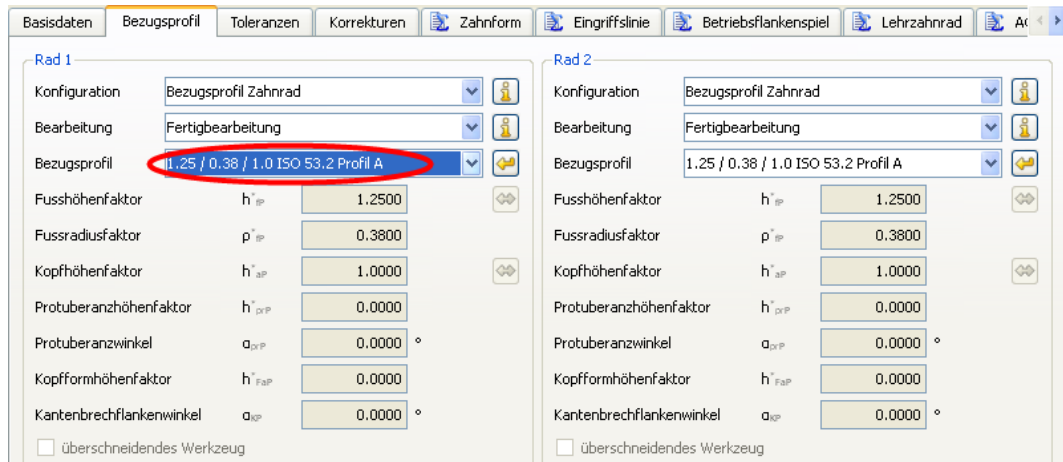

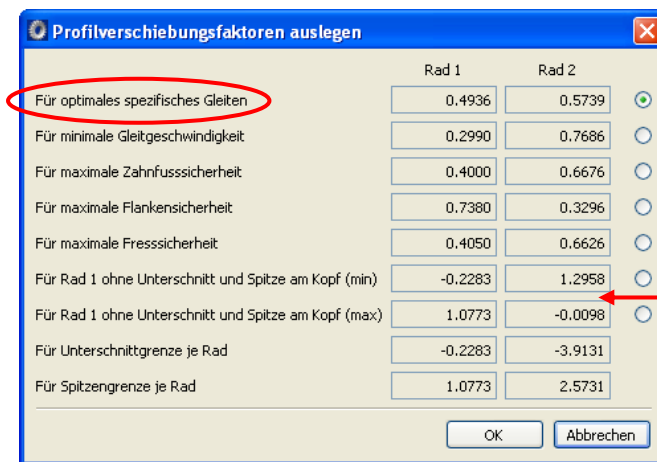
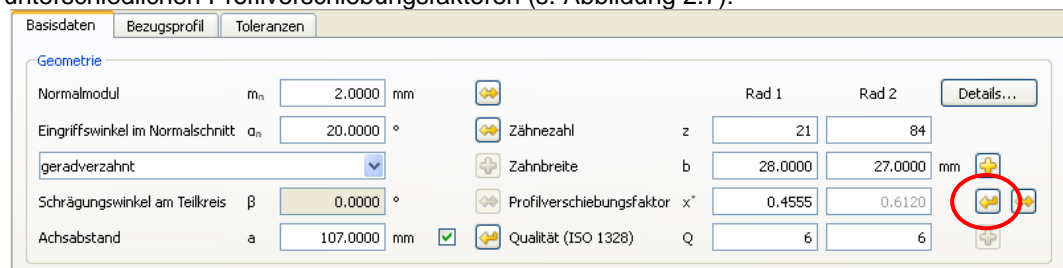


Abbildung 2.6 Tab „Bezugsprofil“, Informationen zum Bezugsprofil


Die Profilverschiebung von Rad 1 (Rad 2 wird entsprechend berechnet) kann wie folgt angepasst werden: Durch das Drücken des Auslegen Button  in der unteren Abbildung erscheint das Dialogfenster „**Profilverschiebungsfaktoren auslegen**“ mit Vorschlägen zu unterschiedlichen Profilverschiebungsfaktoren (s. Abbildung 2.7):

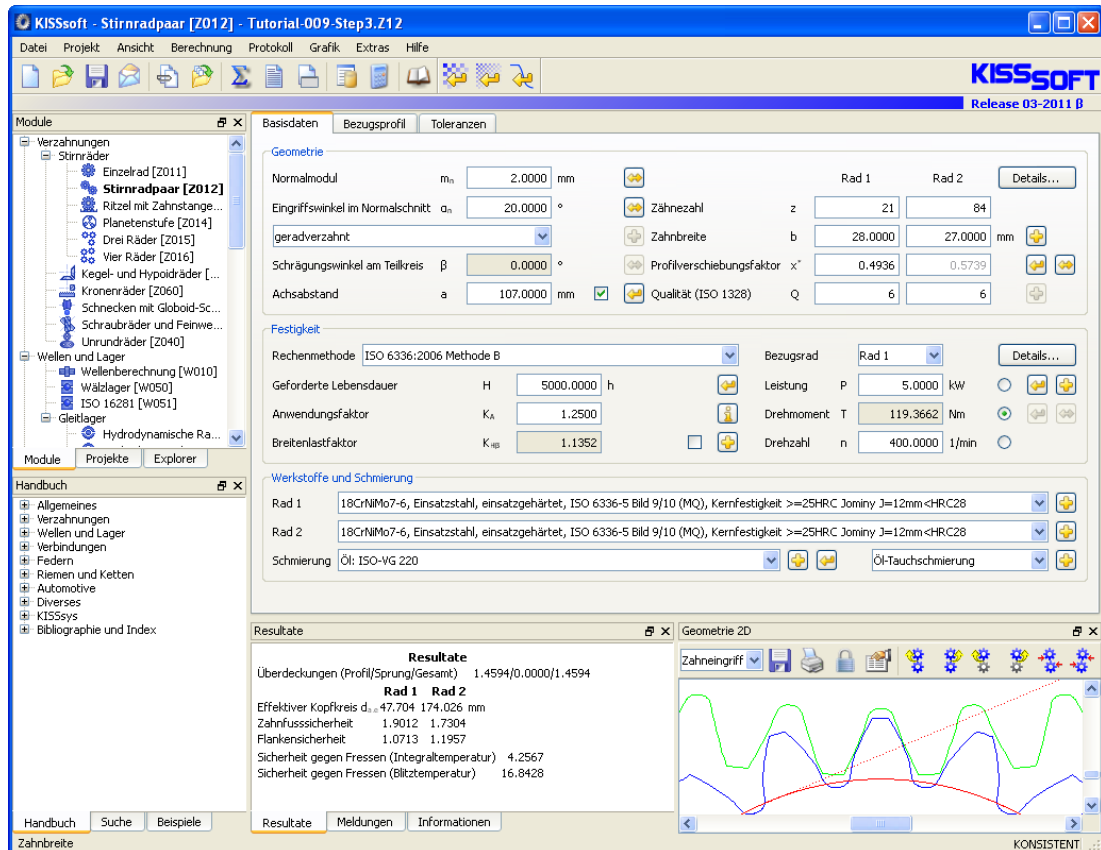


- Verschiedene Methoden für die Auslegung des Profilverschiebungsfaktors
- sinnvolle Vorschläge zum Profilverschiebungsfaktor
- Maximale und minimale Werte (Spitzengrenze ohne Unterschnitt)

Abbildung 2.7 Dialogfenster; Profilverschiebungsfaktoren auslegen

KISSsoft schlägt hier unter Verwendung verschiedener Kriterien geeignete Profilverschiebungsfaktoren vor, in diesem Beispiel soll das spezifische Gleiten ausgeglichen werden. Der gewünschte Vorschlag wird auf der rechten Seite über den „**Auswahl Button**“ ausgewählt und anschliessend mit „**OK**“ übernommen.

Der Profilverschiebungsfaktor x wird nun im Eingabefenster Tab „**Basisdaten**“ Bereich: 'Geometrie' übernommen. Durch Drücken des Symbols  in der Symbolleiste oder „F5“ werden nun die komplette Geometrie, die Fuss- und Flankensicherheiten, die Sicherheit gegen Fressen und die resultierende Überdeckung berechnet (siehe Abbildung 2.8 unten). Die Ergebnisse sollten nun wie folgt aussehen (geringe Abweichung der berechneten Profilverschiebungsfaktoren sind möglich):



Um direkt zu diesem Stand der Berechnung zu gelangen, Datei „Tutorial-009-Step3“ öffnen

Abbildung 2.8 Angepasster Profilverchiebungsfaktor, Ausführen der Berechnung, Resultatübersicht

3 Feinauslegung

3.1 Feinauslegung aufrufen

Nachdem nun über die Grobauslegung ein Zahnradpaar definiert wurde, das die geforderte Leistung übertragen kann, ist dieses Zahnrad bezüglich Geräuschentwicklung und Festigkeit zu optimieren. Wie zur Grobauslegung geht man auf „**Berechnung**“, wählt dann die „**Feinauslegung**“ aus und es erscheint eine weitere Maske „**Feinauslegung**“, in der die Auslegung ausgeführt werden kann.

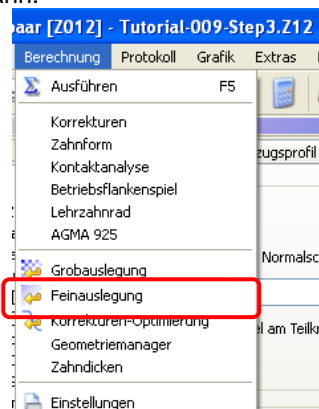


Abbildung 3.1 „Feinauslegung“ starten

Hier können für die folgenden Parameter Bereiche angegeben werden, in denen (mit einer ebenfalls definierbaren Schrittweite) eine Lösung gesucht wird.

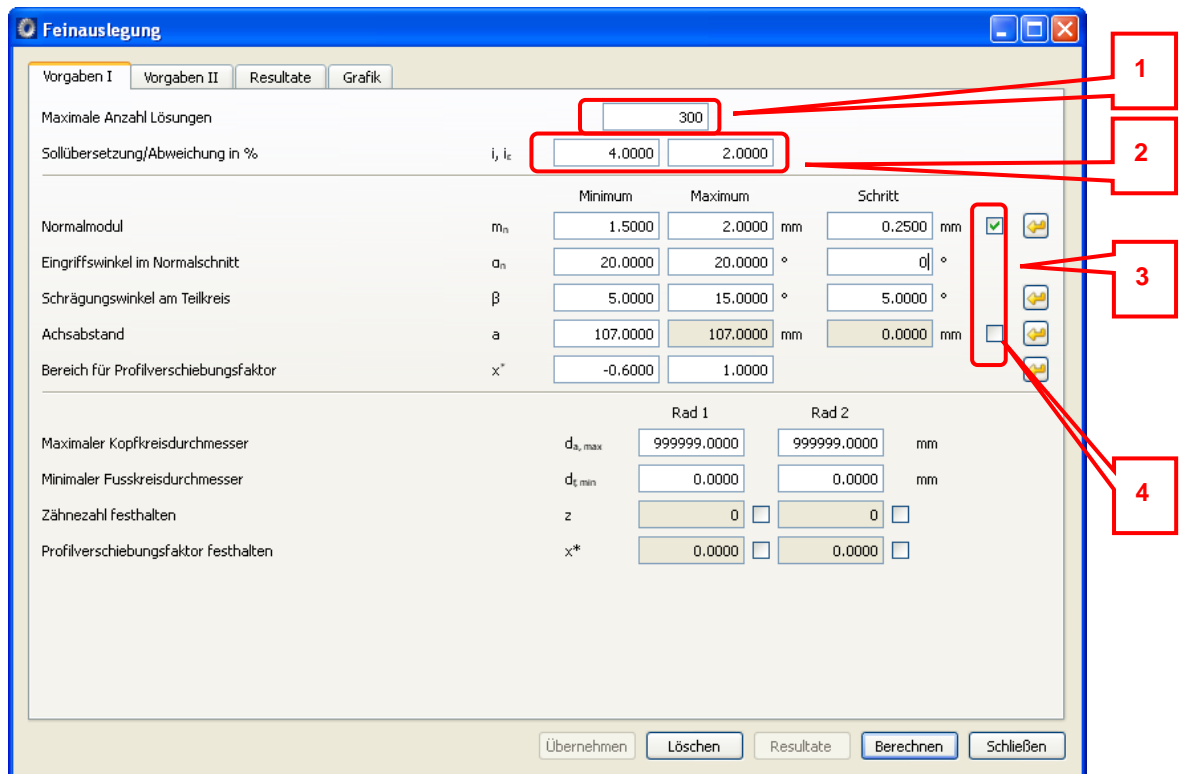



Abbildung 3.2 Eingabefenster - Feinauslegung, Angabe der Parameterbereiche

- (1) Auf 300 setzen
- (2) Angaben zur Sollübersetzung, zulässige Abweichung
- (3) Über den Auslegen Buttons  schlägt KISSsoft sinnvolle Bereiche für die Parameter „Normalmodul“, „Schrägungswinkel“, „Achsabstand“ und „Bereich für Profilverschiebungsfaktor“ vor
- (4) Wählen ob der Achsabstand fest oder variabel

- Bereich für den Normalmodul
- Bereich für den Schrägungswinkel
- Bereich für den Achsabstand (dazu den Haken „Variabler Achsabstand“ setzen)

(Ein Hinweis zur Grössenordnung dieser Werte wurde bereits als Resultat der Grobauslegung gegeben.)

Weiter könnten die folgenden Parameter vorgegeben werden:

- eine Obergrenze für den Kopfkreisdurchmesser
- eine Untergrenze für den Fusskreisdurchmesser
- festhalten der Zähnezahlfesthalten für ein oder beiden Räder (aktivieren der Checkbox für das betreffende Zahnrad; wenn 0: Zähnezahlfesthalten variabel)
- Profilverschiebung für ein oder beiden Räder fest vorgeben (aktivieren der Checkbox für das betreffende Zahnrad)

Es sollen in diesem Beispiel die in Abbildung 3.2 gezeigten Einstellungen getroffen werden. Die Auslegung wird mit „Berechnen“ (Knopf unten) aufgerufen. Der nun ablaufende Algorithmus findet alle möglichen Zahnradkombinationen, welche mit den soeben getätigten Eingaben übereinstimmen.

Wenn der Rechenprozess beendet ist, erscheint die Liste (siehe Abbildung 3.3), in der alle gefundenen Lösungen aufgelistet sind. In diesem Beispiel ist es das Ziel, ein geräuschoptimiertes Zahnrad zu erhalten. Nun können die Resultate nach dem gewünschten Kriterium sortiert werden (z.B. Δc), um die beste Lösung zu finden. Durch Doppelklick auf die gewünschte Variante oder mit „Übernehmen“ wird das Ergebnis übernommen und berechnet.

Ist das erhaltene Resultat nicht optimal, kann eine andere Variante gewählt werden, bis man die optimale Lösung gefunden hat und das Fenster kann geschlossen werden.
Hier wählen wir Lösung 31.

Nr.	a [mm]	m _s [mm]	α [°]	β [°]	z ₁	z ₂	x'₁	x'₂	ε ₀	ε ₁	ε ₂
13	107.000	1.500	20.000	10.000	28	110	0.495	0.854	1.478	0.995	0.995
14	107.000	1.500	20.000	10.000	28	111	0.193	0.597	1.592	0.995	0.995
15	107.000	1.500	20.000	10.000	28	111	0.293	0.497	1.577	0.995	0.995
16	107.000	1.500	20.000	10.000	28	111	0.393	0.397	1.559	0.995	0.995
17	107.000	1.500	20.000	10.000	28	112	0.105	0.152	1.668	0.995	0.995
18	107.000	1.500	20.000	10.000	28	112	0.205	0.052	1.650	0.995	0.995
19	107.000	1.500	20.000	10.000	28	112	0.305	-0.048	1.629	0.995	0.995
20	107.000	1.500	20.000	10.000	28	113	0.029	-0.280	1.731	0.995	0.995
21	107.000	1.500	20.000	10.000	28	113	0.129	-0.380	1.710	0.995	0.995
22	107.000	1.500	20.000	10.000	28	113	0.229	-0.480	1.687	0.995	0.995
23	107.000	1.500	20.000	15.000	27	109	0.222	0.755	1.521	1.483	1.483
24	107.000	1.500	20.000	15.000	27	109	0.322	0.655	1.506	1.483	1.483
25	107.000	1.500	20.000	15.000	27	109	0.422	0.555	1.490	1.483	1.483
26	107.000	1.500	20.000	15.000	27	110	0.129	0.297	1.596	1.483	1.483
27	107.000	1.500	20.000	15.000	27	110	0.229	0.197	1.579	1.483	1.483
28	107.000	1.500	20.000	15.000	27	110	0.329	0.097	1.561	1.483	1.483
29	107.000	1.500	20.000	15.000	28	110	0.036	-0.137	1.666	1.483	1.483
30	107.000	1.500	20.000	15.000	28	110	0.136	-0.237	1.648	1.483	1.483
31	107.000	1.500	20.000	15.000	28	110	0.236	-0.337	1.627	1.483	1.483
32	107.000	1.500	20.000	15.000	28	111	0.036	-0.563	1.710	1.483	1.483
33	107.000	1.750	20.000	5.000	24	95	0.554	0.978	1.419	0.428	0.428
34	107.000	1.750	20.000	5.000	24	96	0.253	0.710	1.548	0.428	0.428
35	107.000	1.750	20.000	5.000	24	96	0.353	0.610	1.531	0.428	0.428
36	107.000	1.750	20.000	5.000	24	96	0.453	0.510	1.512	0.428	0.428
37	107.000	1.750	20.000	5.000	24	97	0.167	0.255	1.634	0.428	0.428
38	107.000	1.750	20.000	5.000	24	97	0.267	0.155	1.614	0.428	0.428
39	107.000	1.750	20.000	5.000	24	97	0.367	0.055	1.592	0.428	0.428
40	107.000	1.750	20.000	10.000	24	95	0.213	0.542	1.557	0.853	0.853
41	107.000	1.750	20.000	10.000	24	95	0.313	0.442	1.540	0.853	0.853
42	107.000	1.750	20.000	10.000	24	95	0.413	0.342	1.521	0.853	0.853
43	107.000	1.750	20.000	10.000	24	96	0.130	0.090	1.638	0.853	0.853
44	107.000	1.750	20.000	10.000	24	96	0.230	-0.010	1.618	0.853	0.853

Abbildung 3.3 Liste aller gefundenen Lösungen im Parameterbereich

Über das Drücken der Taste „Protokoll“ erfolgt die Bewertung der wichtigsten Eigenschaften dieser gefundenen Lösungen in einem Protokoll.

```

ANALYSE DER RESULTATE      (Bewertung von wichtigen Eigenschaften)

Kommentar:
No.           = Nummer der Variante
diff_i        = Abweichung von der Sollübersetzung in %
kg            = Gewicht in kg
Slide         = Spezifisches Gleiten (Maximalwert)
v.Slide       = Gleitgeschwindigkeit (m/s, Maximalwert)
AC/AE         = Eintritt-Eingriffsstrecke AC / Eingriffsstrecke AE
               (Reibverhalten)
del_cg        = Standardabweichung der Steifigkeit beim Abwälzen (N/mm/mym)
               (Berechnung OHNE Berücksichtigung der exakten Zahnform)
1-eta         = Verlust in % (1.0-Gesamtwirkungsgrad)
Safety        = Sicherheit (Zahnfuß und Flanke, 0 = hoch, 1 = genügend, 2 = niedrig)
               (SF-min: 0.60/ 1.20/ 1.40 SH-min: 0.60/ 0.90/ 1.00)
Summary       = Gesamtbewertung (gewichtet)
               (50.0%:del_cg 20.0%:diff_i 100.0%:kg 35.0%:Slide 0.0%:v.Slide
                0.0%:AC/AE 10.0%:1-eta 100.0%:Safety)

(Generell gilt in dieser Tabelle: Je kleiner die Zahl, desto besser!)

No.  diff_i  kg      Slide  v.Slide  AC/AE  del_cg  1-eta  Safety  Summary
  1   0.000  5.392  1.003  0.189   0.519  1.778  1.023  1.145  0.542
  2   0.000  5.379  0.835  0.191   0.472  1.813  1.013  1.248  0.583
  3   0.000  5.367  0.689  0.206   0.423  1.874  1.036  1.270  0.591
...
 72   1.250  5.438  0.820  0.253   0.412  0.200  1.284  0.756  0.385
 73  -1.190  5.432  2.364  0.274   0.477  0.151  1.542  0.660  0.354
 74  -1.190  5.416  1.742  0.294   0.430  0.164  1.558  0.710  0.371

ANALYSE DER RESULTATE
(mit Angabe der Varianten-Nummer in abnehmender Reihenfolge)

Beste Varianten bezüglich Übersetzung:      1   2   3   17  18  19  34  35  36  43 ...
Beste Varianten bezüglich kleinstes Gewicht: 13  31  11  12  30  16  10  3  29  19 ...
Beste Varianten bezüglich Reibverhalten (AC/AE): 61  67  48  45  58  64  39  22  9  42 ...
Beste Varianten bezüglich Variation der Steifigkeit: 12  15  21  17  18  22  13  14  16  20
...
Beste Varianten bezüglich Festigkeit:      73  52  74  53  32  71  65  46  68  72 ...
Beste Varianten insgesamt (Summary):      73  52  74  53  32  65  71  43  67  72 ...

```

Abbildung 3.4 Bewertung der Lösungen.

Wichtige Bemerkung: Die hier beschriebene Vorgehensweise ist sehr kurz gehalten. In der Praxis ist es wichtig, die Liste „**Analyse der Resultate**“ der Feinauslegung sorgfältig durchzusehen. Es ist sehr gut möglich, dass die zweit- oder drittbeste Lösung in Bezug auf Geräusch aus anderen Gründen vorzuziehen ist. Weiter hilfreich ist die graphische Darstellung der Varianten über den Tab „**Grafik**“:

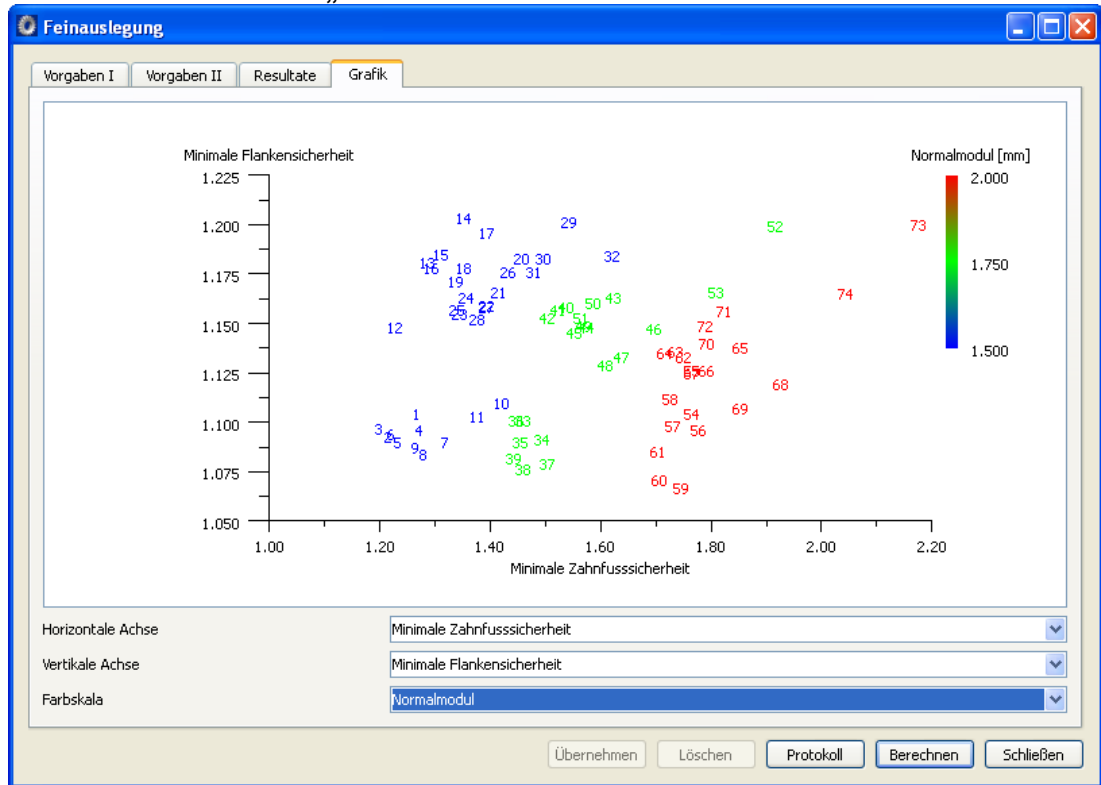
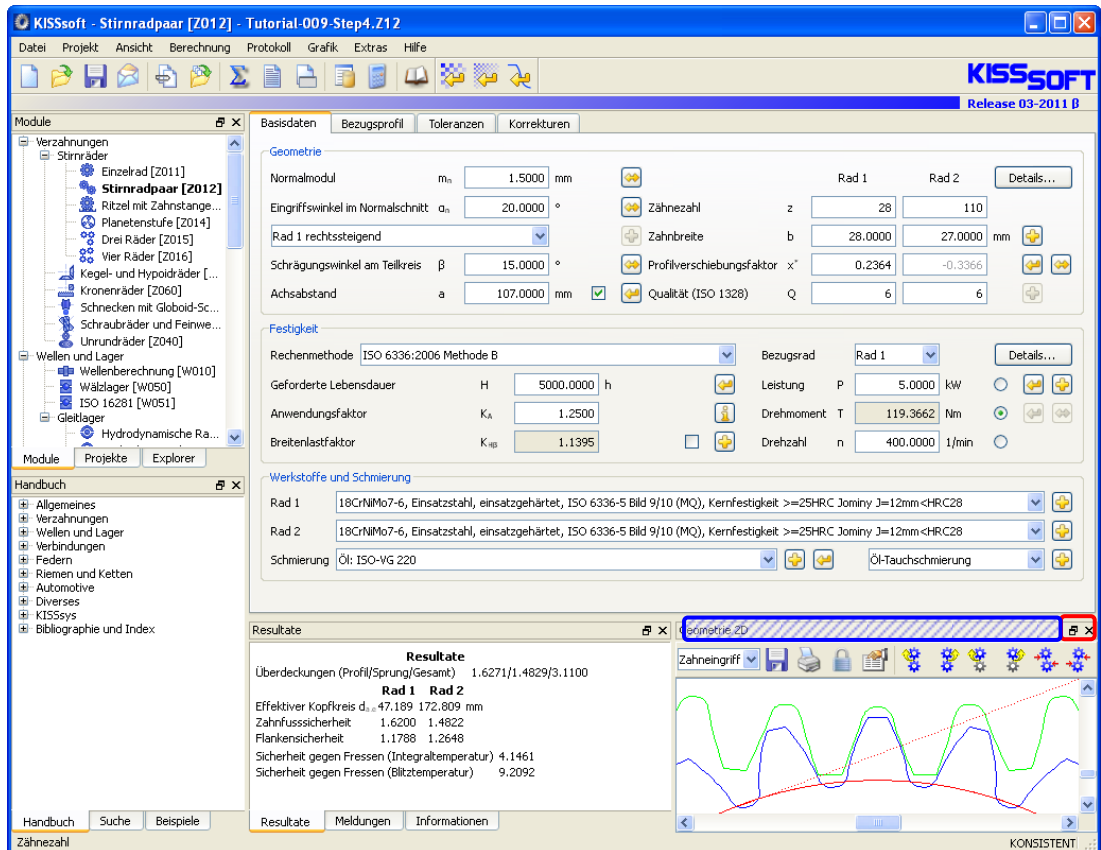


Abbildung 3.5 Grafische Darstellung aller Lösungen

Anhand dieser Grafik kann die optimale Lösung ermittelt werden und unter „**Resultate**“ ausgewählt und übernommen werden.


3.2 Resultat der Feinauslegung

Die Gesamtüberdeckung beträgt nun knapp 3.1, d.h. die Steifigkeitsänderungen über den Eingriff sind klein (siehe Abbildung 3.6), das Zahnrad wird weniger Schwingungen anregen.



Um direkt zu diesem Stand der Berechnung zu gelangen, Datei „Tutorial-009-Step4“ öffnen

Abbildung 3.6: Resultate (Profilverschiebung, Schrägungswinkel, Zähnezahl) aus der Feinauslegung

Die resultierende Zahnform wird wie nachfolgend unter „**Geometrie 2D**“ in einem Grafikenfenster gezeigt und kann über den Knopf  (siehe rote Markierung in Abbildung 3.6) oder mit einem Doppelklick der linken Maustaste im markierten Bereich (siehe blaue Schraffur in Abbildung 3.6) losgelöst und vergrößert werden:

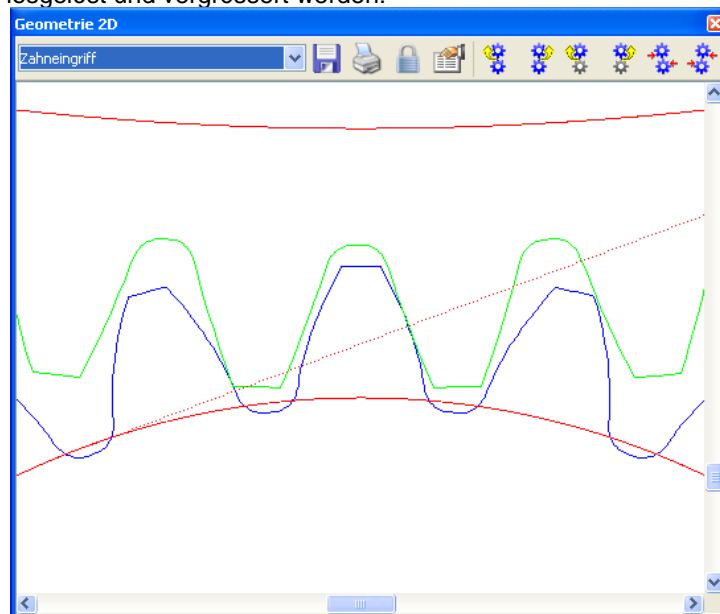


Abbildung 3.7 Resultierende Zahnform (Grundkreise und Eingriffslinie in rot)

Der Steifigkeitsverlauf über dem Eingriff kann nun über „**Grafik**“ → „**Auswertung**“ → „**Theoretische Eingriffssteifigkeit**“ dargestellt werden:

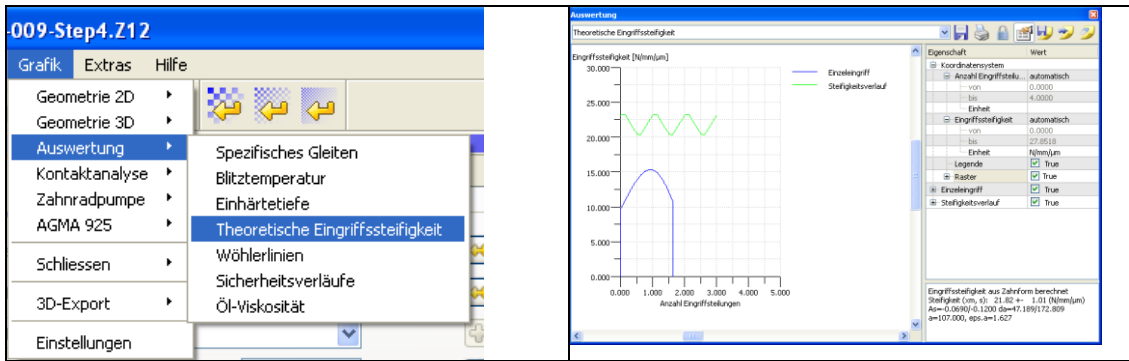


Abbildung 3.8 Verlauf der theoretischen Eingriffstiefe

3.3 Auslegung einer Hochverzahnung

Die bisher bestimmte Lösung soll nun weiter verbessert werden. Dazu soll die Profilüberdeckung ε_a auf rund 2 erhöht werden (Falls später eine Kopfrücknahme vorgenommen wird, ist eine etwas höhere Überdeckung notwendig da diese durch die Kopfrücknahme reduziert wird). Die resultierende Überdeckung soll nun weiter erhöht werden, indem eine Hochverzahnung ausgelegt wird (die anzustrebende Überdeckung kann unter „Modulspezifische Einstellung“, Tab „Auslegungen“, eingestellt werden).

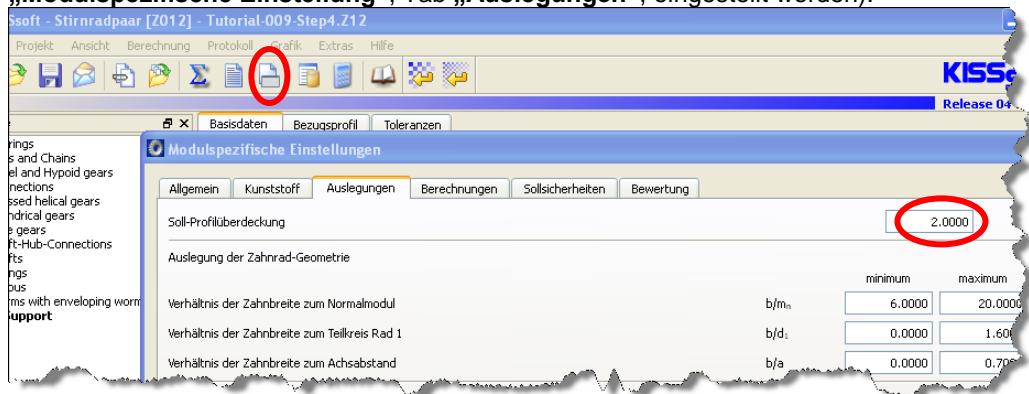


Abbildung 3.9 Modulspezifische Einstellungen

Um eine Hochverzahnung auszulegen, wird erneut die Feinauslegung aufgerufen und dann unter „Vorgaben II“ bei der Checkbox „Hochverzahnung auslegen“ ein Haken gesetzt. Mit dem Berechnen Button werden wiederum die neuen Werte berechnet.

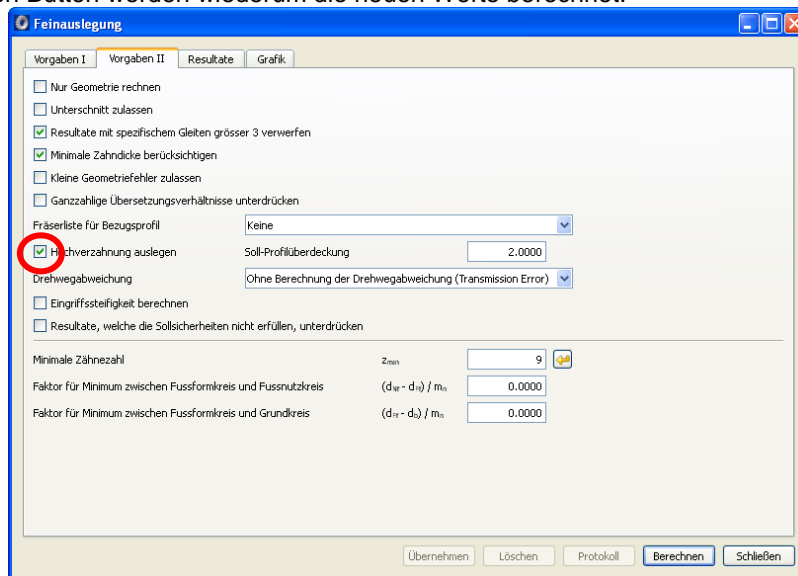
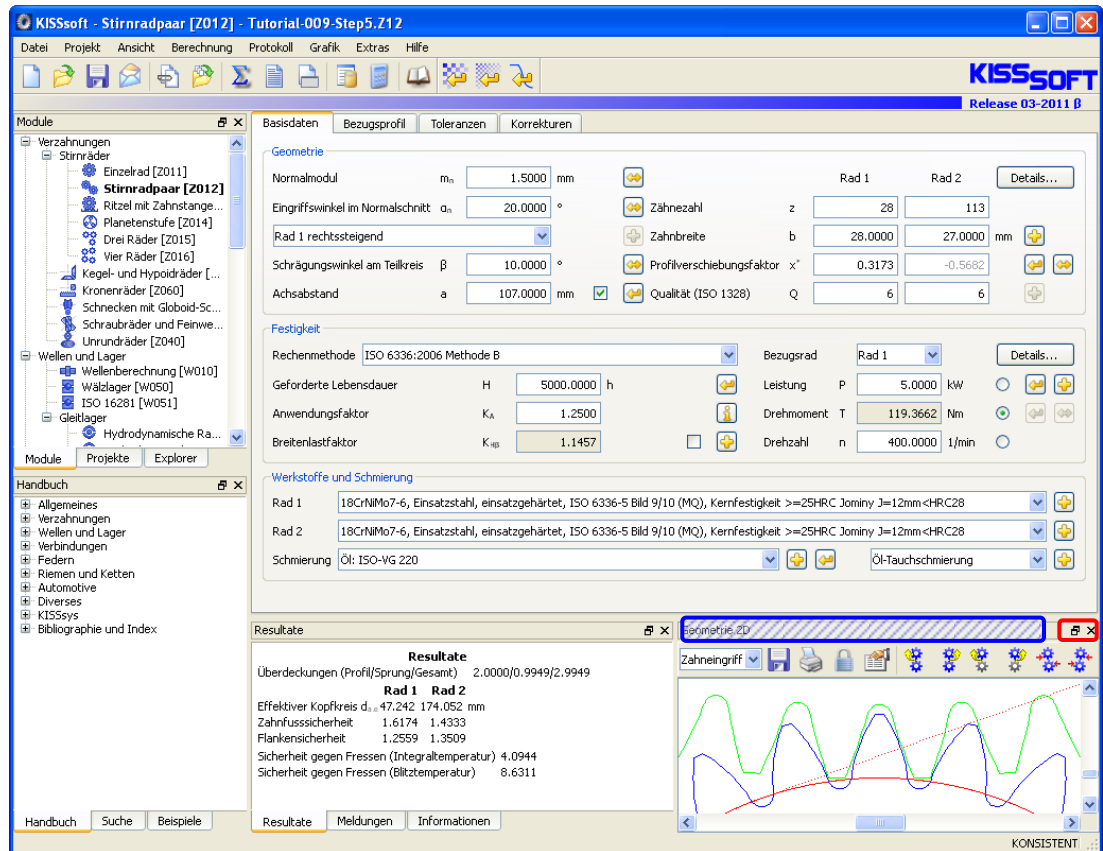



Abbildung 3.10 Einstellungen in der Feinauslegung, Auswahl „Hochverzahnung auslegen“

Die nun bezüglich des Geräuschs favorisierte Variante ist Nummer 25. Nach Auswahl dieser Variante über „Übernehmen“ Button werden die Verzahnungsdaten dieser Variante übernommen. Mit der Auslegung einer Hochverzahnung wurden die Bezugsprofile geändert. Die Zahnradparameter werden nun wieder in die Hauptmaske übernommen (veränderte Zähnezahl, Schrägungswinkel, Profilverchiebung) und die neuen Resultate werden sogleich beim Übernehmen berechnet:



Um direkt zu diesem Stand der Berechnung zu gelangen, Datei „Tutorial-009-Step5“ öffnen

Abbildung 3.11 Neue Verzahnungsdaten und Resultate, insbesondere Überdeckung

Die resultierende Zahnform wird wie nachfolgend unter „Geometrie 2D“ in einem Grafikenster gezeigt und kann über den Knopf  (siehe rote Markierung in Abbildung 3.11) oder mit einem Doppelklick der linken Maustaste im markierten Bereich (siehe blaue Schraffur in Abbildung 3.11) losgelöst und vergrößert werden:

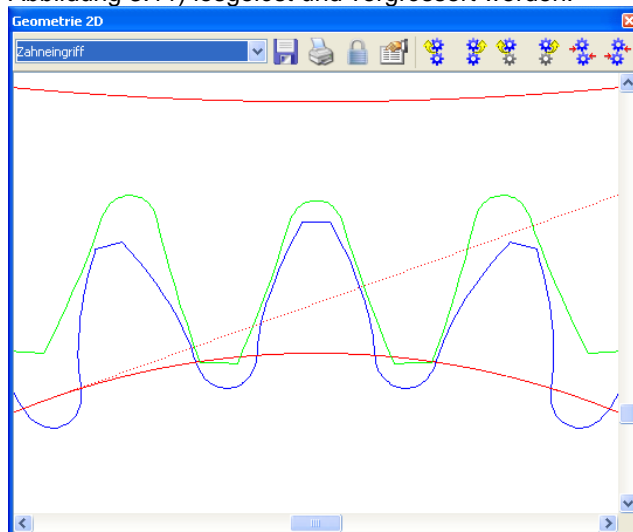


Abbildung 3.12 Resultierende Hochverzahnung

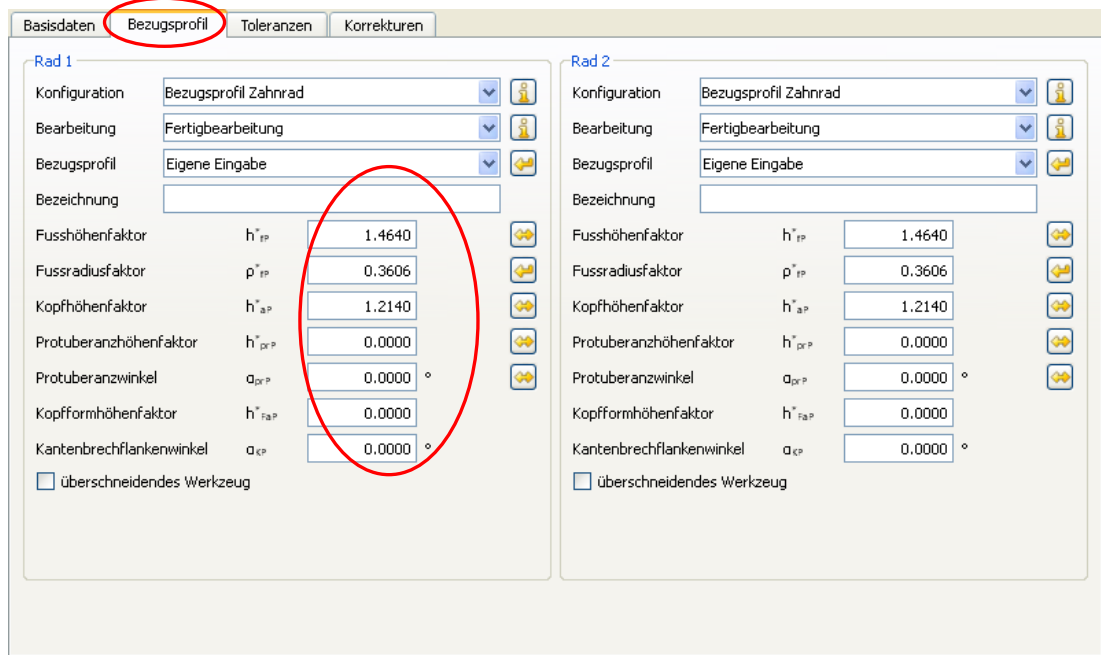


Abbildung 3.13 Einsicht in das Bezugsprofil für Hochverzahnung, über den Tab „Bezugsprofil“

Die resultierende Überdeckung liegt nun sehr nahe bei drei, was zu „einer sehr gleichmässigen Steifigkeit über dem Eingriff führt:

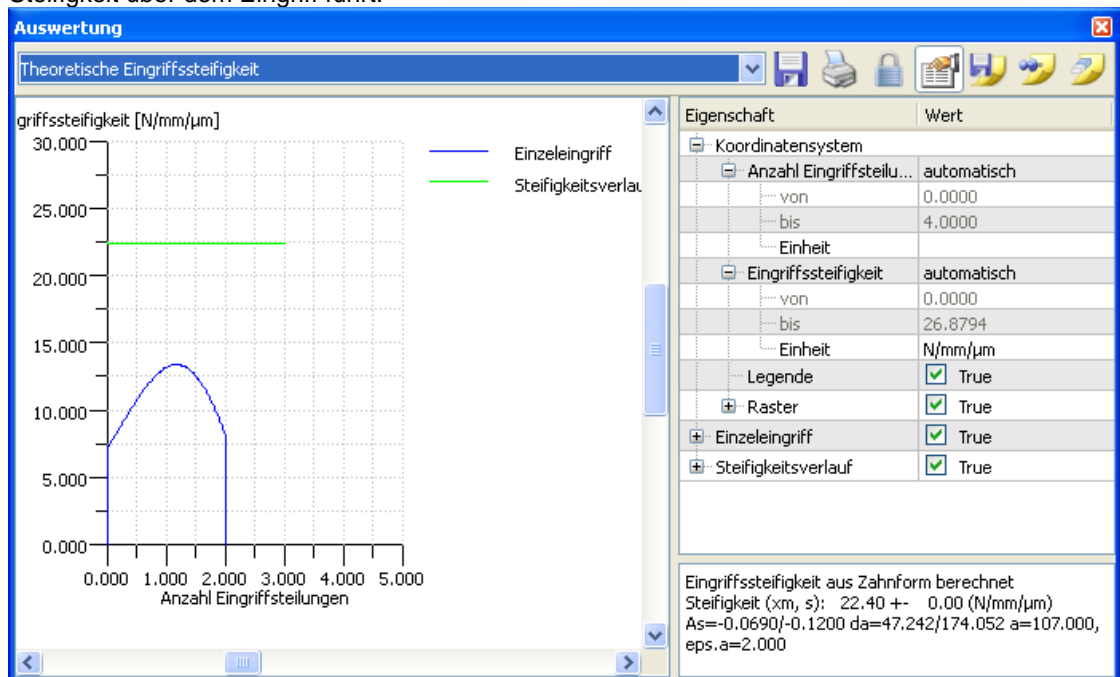



Abbildung 3.14 Theoretischer Steifigkeitsverlauf über den Eingriff

3.4 Weitere Angaben zur Festigkeitsberechnung

Für den abschliessenden Festigkeitsnachweis der Verzahnung sind noch Angaben zur Schmierung sowie zum Breitenlastfaktor zu treffen:

Abbildung 3.15 Eingaben der Schmierung und Aufrufen der Eingabe für den Breitenlastfaktor

Auswahl der Schmierungsart sowie des Schmiermittels können direkt in der Dropdownliste ausgewählt werden (linke und rechte Markierung). Die Liste der Schmiermittel kann auch über das Datenbanktool erweitert werden.

Die Schmierstofftemperatur wird über den Plus Button  (untere, rechte Markierung siehe Abbildung 3.15) bestimmt.

Betriebs- und Umgebungs- oder Gehäusetemperatur können über den Reiter „Betriebsflankenspiel“ eingegeben werden (siehe Markierungen in der untenstehenden Abbildung).

Abbildung 3.16 Betriebsflankenspiel

Der Breitenlastfaktor kann nach Methode A, B oder C definiert werden.

Siehe dazu die separate Anleitung „kisssoft-anl-072-D-Kontaktanalyse-Stirradberechnung“ die über den KISSsoft Support bezogen werden kann.

Im Regelfall sind hier keine Änderungen notwendig.

Abbildung 3.17 Angaben weiterer Parameter, insbesondere Eingaben für die Bestimmung des Breitenlastfaktors

Wichtige Bemerkung:

Falls die Festigkeit oder Lebensdauer bei der Beurteilung der in der Feinauslegung berechneten Varianten relevant ist, so müssen die obigen Eingaben vor der Durchführung der Feinauslegung definiert werden.